

Ergänzende Stellungnahme zur Methodik der Anwendung der Abwägungskriterien im „BGE-Zwischenbericht Teilgebiete“

Bearbeitungsstand 03.08.2021

Anlass

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) hat am 28.09.2020 den „Zwischenbericht Teilgebiete“ gemäß § 13 Abs. 2 S. 3 StandAG veröffentlicht. Das LBEG hat eine erste kritische Würdigung zur Methodik der Anwendung der Abwägungskriterien für Niedersachsen am 01.02.2021 als Anlage 3 seiner Stellungnahme zum BGE-Zwischenbericht Teilgebiete verfasst.

Die nachfolgende Stellungnahme ergänzt und vervollständigt unsere Anmerkungen nun zu folgenden Anlagen nach StandAG § 24 Absatz 3 bis 5:

- Anlage 1 (zu StandAG § 24 Absatz 3): „Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (neue verkürzte Zusammenfassung)
- Anlage 2 (zu StandAG § 24 Absatz 3): „Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“ (neu)
- Anlage 3 (zu StandAG § 24 Absatz 3): „Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“ (neu)
- Anlage 4 (zu StandAG § 24 Absatz 3): „Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse“ (neu)
- Anlage 6 (zu StandAG § 24 Absatz 4): „Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ (neu)
- Anlage 8 (zu StandAG § 24 Absatz 5): „Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit“ (neu)
- Anlage 11 (zu StandAG § 24 Absatz 5): „Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge“ (Ergänzung)

Wir weisen darauf hin, dass wir eine abschließende Bewertung der von der BGE vorgenommenen „sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien“ (BGE 2020k) nicht vornehmen können, da eine Einsicht in das „Bewertungsmodul“ als Datenbankanwendung und damit eine vollständige Nachvollziehbarkeit fehlt.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Anlass..... | 1 |
| 1 Zu Anlage 1 (zu StandAG § 24 Absatz 3): „Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“..... | 3 |
| 2 Zu Anlage 2 (zu StandAG § 24 Absatz 3): „Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“..... | 6 |
| 3 Zu Anlage 3 (zu StandAG § 24 Absatz 3) „Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“ | 11 |
| 4 Zu Anlage 4 (zu StandAG § 24 Absatz 3): „Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse“ | 14 |
| 5 Zu Anlage 6 (zu StandAG § 24 Absatz 4): „Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ | 17 |
| 6 Zu Anlage 8 (zu StandAG § 24 Absatz 5): „Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit“ | 21 |
| 7 Zu Anlage 11 (zu StandAG § 24 Absatz 5): Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge | 23 |
| 8 Verwendete Unterlagen | 28 |

1 Zu Anlage 1 (zu StandAG § 24 Absatz 3): „Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“

1.1 Vorbemerkung und zusammenfassende Bewertung

Das Kriterium zu Anlage 1 (zu § 24 Absatz 3, StandAG): „Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ wird von der BGE im derzeitigen Verfahrensschritt ausschließlich auf Grundlage der wirtsgesteinsspezifischen Referenzdatensätze bewertet (BGE 2020, S. 121). Dieses Vorgehen ist grundsätzlich nachvollziehbar, da gebietsspezifische Informationen zu den einzelnen Indikatoren dieses Kriteriums nicht in ausreichendem Maße vorliegen. Folgende Indikatoren sind lt. Anlage 1, StandAG § 24, zu betrachten:

- Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit
- Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers
- Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25°C
- Absolute Porosität (als Indikator für den effektiven Diffusionskoeffizienten in Tongestein)
- Verfestigungsgrad (als Indikator für den effektiven Diffusionskoeffizienten in Tongestein)

Im Ergebnis bewertet die BGE alle Indikatoren dieses Kriteriums für alle Wirtsgesteine mit „*günstig*“. Dieses Ergebnis ist grundsätzlich plausibel. Aus unserer Sicht sollte jedoch die in den Referenzdatensätzen zusammengefasste Datengrundlage erweitert und deren methodische Auswertung angepasst werden. Darüber hinaus sollte die Anwendbarkeit des Darcy-Gesetzes zur Ermittlung von Durchlässigkeiten und Abstandsgeschwindigkeiten in den drei potentiellen Wirtsgesteinen differenzierter betrachtet und diskutiert werden.

1.2 Verwendung der Referenzdatensätze als Bewertungsgrundlage

Die Anzahl der Literaturquellen auf deren Basis in BGE (2020b) die wirtsgesteinsspezifischen Gesteinseigenschaften abgeleitet werden ist z.T. sehr gering (z.B. lediglich zwei Literaturquellen zum Diffusionskoeffizienten in Kristallingestein). Eine geringe Datenbasis ist einerseits nachvollziehbar, da die Ermittlung hydrogeologischer Kennwerte in Geringleitern grundsätzlich aufwändig ist und oftmals auch nicht im Fokus der Erkundungen steht, so dass für die potentiellen Wirtsgesteine erwartungsgemäß wesentlich weniger Daten verfügbar sind als z.B. für potenziell kohlenwasserstoffführende Sandsteine. Vor diesem Hintergrund schätzen wir die von der BGE verwendete Datenbasis für eine erste Einschätzung in Schritt 1, Phase 1 zunächst als ausreichend ein. Andererseits existieren in der internationalen Fachliteratur über die aktuell von der BGE verwendeten Literaturquellen hinaus weitere Quellen, die bei erneuter Anwendung der Referenzdatensätze im weiteren Verfahren von der BGE berücksichtigt werden sollten.

Zudem ist festzuhalten, dass es sich aktuell bei den „Referenzdatensätzen“ strenggenommen nur um eine Sammlung von Literaturreferenzen handelt. Es bleibt offen, ob eine Überführung der quantitativen Daten aus den Literaturquellen in eine auswertbare Datenbank erfolgt ist. Dieser Schritt wäre von großem Nutzen, da dadurch eine transparente und nachvollziehbare statistische Auswertung der Daten (z.B. Mittelwert und Bandbreite, sowie insbesondere der lt. BGE (2020a, S. 16) für die Bewertung anzusetzende Wert im Bereich des 75- bis 90%-Perzentsils) möglich wird.

Hinsichtlich der zukünftig durchzuführenden statistischen Auswertung der Referenzdatensätze weisen wir darauf hin, dass es sich bei den von der BGE verwendeten Quellen (vgl. Literaturverzeichnis der Unterlage BGE (2020b)) nur untergeordnet um wissenschaftliche Artikel aus Fachzeitschriften handelt. Inwieweit diese Daten einer Qualitätssicherung z.B. ein peer-review-Verfahren durchlaufen haben, ist nicht nachvollziehbar. Vor diesem Hintergrund erscheint eine unabhängige Bewertung der Qualität und Vergleichbarkeit der erhobenen Daten bzw. der verwendeten Methoden unerlässlich, um belastbare und dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechende Ergebnisse zu erlangen.

1.3 Gültigkeit und Anwendbarkeit des Darcy-Gesetzes

Für die Berechnung der Ausdehnung eines ewG ist die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers und transportierter Radionuklide von entscheidender Bedeutung. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Radionuklide sich in einem vernetzten Porenraum oder z.B. in einer einzelnen Kluft bewegen. Die BGE geht im Zwischenbericht Teilgebiete davon aus, dass das Darcy-Gesetz gleichermaßen für alle drei Wirtsgesteine angewandt werden kann. Die Eigenarten der Wirtsgesteine werfen jedoch die Frage auf, in wieweit das für poröse Medien empirisch ermittelte statistische Fließgesetz nach Darcy in den unterschiedlichen Wirtsgesteinen sinnvoll angewendet werden kann bzw. darf. Hierzu folgende Anmerkungen:

- **Tongestein** ist näherungsweise als poröses Medium mit vernetztem Porenraum im Sinne des Darcy-Gesetzes anzusehen. Der typische Porendurchmesser im Tongestein ist $< 2 \mu\text{m}$ (Jasmund und Lagaly 1993). Ab Porengrößen von $< 1 \mu\text{m}$ kann Adsorptions- und Adhäsionswasser den Durchfluss von Poren „blockieren“ (Busch et al. 1993). Dies bewirkt u.a., dass - je nach Verfestigungsgrad der Tongesteine - die effektive durchflusswirksame Porosität n_{eff} deutlich kleiner ist als die Gesamtporosität n . Ein Gleichsetzen der effektiven Porosität mit der absoluten Porosität (S. 28 in BGE 2020a) führt somit zu einer erheblichen Unterschätzung der Abstandsgeschwindigkeit. Laborversuche zeigen, dass bei der Durchströmung von Geringleitern mit wässrigen Fluiden ein prälinearer Bereich zu beobachten ist, indem gar keine bzw. eine nichtlineare Durchströmung stattfindet (Engelhardt und Tunn 1956, Stober 1989). Auf das Rückhaltevermögen von Tongestein gegenüber wässrigen Fluiden wirkt sich dies grundsätzlich positiv aus. In wieweit es die Durchführung, Auswertung und Interpretation von hydraulischen Versuchen im Tongestein beeinflusst, sollte die BGE einschätzen und darlegen.
- **Kristallingestein** stellt kein einheitlich poröses Medium dar, sondern ist i. d. R. durch wasserführende Trennflächen einerseits und eine nahezu undurchlässige Gesteinsmatrix andererseits charakterisiert. Das Trennflächengefüge kann bereichsweise aus erratisch verteilten Einzelflächen oder Klüften bestehen, die mehr oder weniger stark vernetzt sind. Mit zunehmendem Vernetzungsgrad können auch Bereiche angetroffen werden, in denen näherungsweise „homogene“ Trennflächengefüge ausgebildet sind. In solchen Fällen wird von einigen Autoren (Song 2016)¹ ein REV (Repräsentatives-Elementar-Volumen) postuliert, für das die Gebirgsdurchlässigkeit nach dem Darcy-Gesetz ermittelt werden kann. Ein hoher Vernetzungsgrad bedingt in der Regel eine höhere

¹ Hierzu führt Song (2016) aus: „Allgemein werden effektive Parameter [z.B. die Gebirgsdurchlässigkeit] über ein repräsentatives Elementarvolumen (REV) bestimmt (Bear, 1972). Ein REV ist das minimale Skalenvolumen eines untersuchten Systems, nach dem die betrachtete Eigenschaft des Systems überwiegend konstant bleibt (Bear 1972, Abb. 1.2). Allerdings besteht keine Garantie, dass ein REV für jedes Kluftsystem ermittelt werden kann (Neuman 1994). Nach Prüfung des REV kann das Kluftsystem eventuell als ein äquivalentes poröses Kontinuum ersetzt werden, welches eine großräumige hydraulische Modellierung ermöglicht (Blum et al. 2007).“

Gebirgsdurchlässigkeit, so dass diese Bereiche vermutlich weniger gut geeignet sind für die Realisierung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG). Ein ewG sollte von möglichst wenigen Trennflächen durchzogen sein, damit die Mindestanforderung für die Durchlässigkeit erreicht werden kann. Da Kristallin keine poröse Gesteinsmatrix hat, kann für eine einzelne Kluft mit geringer Konnektivität auch kein REV ermittelt werden. Folglich stellt sich die Frage nach welchem Fließmodell die Gebirgsdurchlässigkeit und Abstandsgeschwindigkeit ermittelt werden soll, um diese Werte mit denen für Steinsalz und Tongestein vergleichen zu können. Im Kristallingestein erscheint es sinnvoll, alternative Fließgesetze, wie z.B. das „cubic law“ (Louis 1967) zu betrachten und ggfs. heranzuziehen.

- **Steinsalz** ist in unverritztem Zustand impermeabel und weist bei endlagerrelevanten Teufen und Temperaturen keinen wassererfüllten zusammenhängenden Porenraum auf, der einen advektiven Stofftransport und damit eine Durchlässigkeit im Sinne des Darcy-Gesetzes ermöglichen würde. Grundsätzlich stellt sich daher die Frage, wie physikalisch sinnvoll das Fließgesetz nach Darcy im Steinsalz angewandt werden kann um bspw. Abstandsgeschwindigkeiten zu berechnen.

1.4 Weitere Hinweise

- Auf S. 108 dritter Absatz wird konstatiert, dass die Ermittlung der Diffusionsgeschwindigkeit mit tritiiertem Wasser HTO nicht möglich ist, weil es sofort zu Lösung von Salz kommt.
 1. Frage: Warum wird keine gesättigte Salzlösung verwendet?
 2. Frage: Könnte H₂-Gas (HT-Gas) für die Messung verwendet werden?
- Auf S. 22, S. 64 und S. 102: Angabe der Einheiten zum Parameter Fluidichte ρ sollte nicht [m/s²] sondern [kg/m³] sein.
- In der Praxis wird der hydraulische Gradient mit i für h/l verwendet. Um konsistent zu Kapitel 4.1.3 Abstandsgeschwindigkeit v_a zu sein, sollte der hydraulische Gradient i in Kapitel 4.1.2 Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit eingeführt werden. Gleiches gilt für die Kapitel 5.1.3 und 5.1.2, sowie 6.1.3 und 6.1.2.
- Im Tabellenabschnitt auf Seite 25 mit dem Literaturzitat (Klinge & Neumann-Redlin 1986) passt die Standortbeschreibung z.B. Hilssandstein nicht in die Rubrik „Tongestein“.
- Auf S. 106 erster Absatz wird konstatiert, dass „*prinzipiell keine Grundwasserströmung statt[findet] und einzig diffusiver Stofftransport, mit entsprechend geringen Transportmengen*“ möglich ist. Hier fehlt ein Literaturzitat und eventuell ein Hinweis mit welcher Methode Diffusionskoeffizienten ermittelt wurden.
- Die Literaturangabe zu „Navarro (2005)“ in BGE (2020b) fehlt.
- Auf Seite 33 (BGE 2020a) erster Absatz wird der Begriff „*durchflusswirksam*“ anstelle „*diffusionswirksam*“ verwendet.

2 Zu Anlage 2 (zu StandAG § 24 Absatz 3): „Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“

2.1 Vorbemerkung

Die Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG umfasst das „Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“, welches im StandAG mit fünf Indikatoren für Tongestein und vier Indikatoren für die Wirtsgesteine Salz und Kristallin untersetzt ist. Die Indikatoren sind:

- Barrierenmächtigkeit [m]
- Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich
- Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]
- Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)
- Anwendung nur für Tongestein: Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können (Potenzialbringer)

Das Kriterium bewertet das Einschussvermögen der barrierewirksamen Gesteine. Da in diesem Verfahrensschritt noch keine Daten für Modellrechnungen für die Ableitung des Einschussvermögens vorliegen, werden für eine erste Bewertung räumliche Charakteristika (Mächtigkeit, Umschließung, Tiefenlage und Ausdehnung) sowie im Falle des Wirtsgesteins Tongestein das hydraulische Potenzial angrenzender Grundwasserleiter an barrierewirksame Gesteine herangezogen.

Auf S. 57 in BGE (2020a) wird eine Festlegung für die derzeitigen Bewertungen beschrieben, nach der *„Wirtsgestein und ewG [sind] Teil ein und desselben Gesteinskörpers“* sind. In diesem Schritt des Verfahrens beziehen sich unsere Bewertungen zu Kriterium 2 nur auf diese „Normalfall“-Konfiguration (keine Betrachtung von Sonderkonfigurationen wie z.B. ewG außerhalb des Wirtsgesteins).

Alle Indikatoren dieses Kriteriums werden laut BGE auf Basis von gebietsspezifischen Daten für alle identifizierten Gebiete individuell bewertet.

Die Gesamtbewertung des Kriteriums für jedes identifizierte Gebiet erfolgt nach der jeweils schlechtesten Bewertung der Indikatoren „Barrierenmächtigkeit [m]“, „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]“ und „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)“.

2.2 Gekoppelte Betrachtung der Kriterien und Indikatoren

Die Abwägungskriterien und ihre Indikatoren sollten grundsätzlich nicht nur isoliert, sondern auch gekoppelt betrachtet werden. Dies wird auch von der BGE als methodischer Ansatz genannt (BGE 2020k, S. 55). Nach einer individuellen Bewertung der Kriterien bzw. Indikatoren sollten Wechselwirkungen mit den Bewertungen bei anderen Kriterien geprüft und ggf. Gewichtungen vorgenommen werden. Dies wird gemäß BGE (2020a, S. 76) für eine bestimmte Indikatorkopplung bereits umgesetzt: *„Für die zusammenfassende Bewertung des Kriteriums ist die räumliche Konstellation der Indikatoren „Barrierenmächtigkeit“ und „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ zueinander zu beachten. (...) Diese Überprüfung ist bei der zusammenfassenden Bewertung jedes identifizierten Gebietes zu berücksichtigen und in der Begründung zu dokumentieren.“*

U.E. haben auch die Ausprägungen der Indikatoren „Barrierenmächtigkeit“ und „Potenzialbringer“ einen großen Einfluss auf die Beurteilung der geologischen Gesamtsituation. Bei einer belastbar abgeleiteten hohen Barrierenmächtigkeit wird der Indikator Potenzialbringer voraussichtlich von untergeordneter Bedeutung in der Gesamtbewertung sein.

2.3 Methodik der Gesamtbewertung des Abwägungskriteriums

Laut BGE (2020k, S. 56) erfolgt die vorgenommene Gesamtbewertung des Kriteriums 2 nach den jeweils schlechtesten Bewertungen der Indikatoren „Barrieremächtigkeit [m]“, „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberkante]“ und „Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)“. Diese pauschale Herangehensweise ist aus geowissenschaftlicher Sicht nicht nachvollziehbar, wenn die Koppelung von Indikatoren und Kriterien eine Rolle spielen soll. Bei der Bewertung sollte ein größerer Fokus auf die geologische Gesamtsituation gelegt werden anstatt auf eine isolierte Bewertung der einzelnen Indikatoren. Wenn z.B. das potenzielle Wirtsgestein sehr mächtig ist („große Barrierenmächtigkeit“), dann muss die Teufe der oberen Begrenzung des potenziellen Wirtsgesteins nicht tief sein, da in der Tiefe ggfs. genügend Platz innerhalb des potenziellen Wirtsgesteins für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) vorhanden wäre. Die obere Begrenzung des ewG könnte in einer ausreichend großen Tiefe liegen und müsste nach diesem Indikator mit „*günstig*“ bewertet werden, während die Bewertung bezogen auf das potenzielle Wirtsgestein „*ungünstig*“ ausfiele. Nach BGE (2020, S. 121) erfolgte die *„Bewertung dieser Indikatoren [...] anhand der Informationen aus den Modellierprotokollen (BGE 2020j, 2020l) den Geomodellen und den daraus exportierten Informationen bezüglich der Mächtigkeit und der Teufe der entsprechenden identifizierten Gebiete.“*

2.4 Individuelle Bewertung anhand gebietsspezifischer Daten

Laut BGE wurde für dieses Kriterium eine *„individuelle Bewertung anhand gebietsspezifischer Daten“* vorgenommen. Die Datenbasis stellt jedoch größtenteils nicht lithologisch und im Fall von Salzstrukturen nicht nach Internbau differenzierte Körper dar, die aus kleinmaßstäblichen geologischen 3D-Modellen oder mittels anderer Daten neu erstellter Geomodelle abgeleitet wurden. Aufgrund der hier ersichtlichen Knappheit der zur Bewertung nutzbaren Daten und der geringen Detailtiefe der Daten wurden dann auch viele Indikatoren pauschal bewertet, z.B. für alle Salzstrukturen. Bei unvollständigem Vorhandensein von Geomodelldaten in identifizierten Gebieten in den Wirtsgesteinen Tongestein, stratiformes Steinsalz und kristallines Wirtsgestein wurden flächenkonservativ die nicht mit Modelldaten abgedeckten Bereiche für das gesamte Kriterium pauschal mit „*günstig*“ bewertet (BGE 2020k, S.42). Für diese Vorgehensweise die Bezeichnung „*individuell*“ und „*gebietsspezifisch*“ (gerade bei räumlich eng begrenzten Strukturen) zu verwenden, ist aufgrund der zahlreichen pauschalen Annahmen zum jetzigen Verfahrensstand eher irreführend.

2.5 Aussagekraft der Eingangsdaten

Die BGE führt in BGE (2020k, S. 56) an, dass diesem Kriterium zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund der Datenlage eine besondere Bedeutung zukomme, da die Parameter der meisten Indikatoren „*einfacher zu ermitteln*“ seien, als beispielsweise spezifische Gesteinseigenschaften. Es lägen Daten für drei der vier Indikatoren vor und daher sei *„die Konfiguration der sicherheitsrelevanten Gesteinskörper ein früh erkennbares Merkmal einer günstigen geologischen Gesamtsituation und ist insbesondere zum jetzigen Zeitpunkt [...] von besonderer Bedeutung.“* Hier wird der Eindruck erweckt, dass „*einfach*“ und „*früh*“ ermittelbare Daten auch eine hohe Genauigkeit und hohe Aussagekraft hinsichtlich einer günstigen

geologischen Gesamtsituation bedeuten. Allerdings basieren die genannten, zur Bewertung herangezogenen Daten/Parameter größtenteils auf kleinmaßstäblichen 3D-Modellen oder Karten, die eine „Übersichtsfunktion“ haben und eine detaillierte geologische Situationen nicht wiedergeben können. Auch Mächtigkeits- und Tiefenangaben von Schichteinheiten sind in geologisch komplexen Gebieten in den Modellen nur generalisiert dargestellt. Die Anwendung der engständig differenzierten Wertungsgruppen der Indikatoren „Barrieregesteinsmächtigkeit“ und „Tiefenlage der Barrieregesteinsoberfläche“ auf der Basis kleinmaßstäblicher 3D-Modelle ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Eine „*ungünstige*“ Bewertung kann unter Umständen zu einem unumkehrbaren Ausschluss eines Gebietes führen. Für Niedersachsen stammen die derzeitigen Eingangsdaten überwiegend aus dem Geotektonischen Atlas 3D (GTA3D). Der GTA3D beruht auf Übersichtskarten, die in den 1990er Jahren erstellt wurden. Somit eignet sich das 3D-Modell zunächst für Bewertungen mit einer geringen Detailtiefe. In einem flächenkonservativ überschätzenden Ansatz sind diese Eingangsdaten grundsätzlich noch plausibel anwendbar. Für die nächsten Verfahrensschritte, bei denen es um eine deutliche Eingrenzung hin zu kleineren Flächen gehen wird, werden detailliertere großmaßstäbliche Betrachtungen nötig sein.

2.6 Isolierte Teilflächen

Laut BGE (2020k, S.46) erfolgte die Bewertung der identifizierten Gebiete hinsichtlich des Indikators „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)“ anhand der Gesamtfläche des jeweiligen identifizierten Gebiets ohne Teilflächenprüfung. Das bedeutet, dass identifizierte Gebiete, die aus mehreren Teilflächen bestehen, als eine theoretisch zusammenhängende Fläche betrachtet wurden. Dies stellt eine Überschätzung der zur Verfügung stehenden zusammenhängenden Fläche dar. Als Folge dieses Vorgehens tragen nun z.B. kleine isolierte Rest-Zwickel und Inseln von nicht annähernd dem 2-fachen der nötigen Mindestfläche eine nur für das gesamte Teilgebiet gültige Bewertung „*günstig*“. Eine Identifizierung hiervon betroffener Teilflächen und eine differenziertere Bewertung sollte im nächsten Schritt des Verfahrens erfolgen.

2.7 Heterogenität der räumlichen Konfiguration in großen Teilgebieten

Die sehr großen Teilgebiete weisen innerhalb ihrer Verbreitungsräume sehr unterschiedliche räumliche Konstellationen auf. Beispielsweise schwankt die Mächtigkeit des Tongesteinsgebietes der Unterkreide in Niedersachsen von 100 m bis weit über 1.500 m. Die Tiefenlage der oberen Begrenzung kann an der Geländeoberfläche bzw. unter geringmächtiger Quartärbedeckung liegen, sie kann aber auch in großen Tiefen bis 1.400 m vorkommen. In Randbereichen oder in Störungsbereichen kann die Flächenausdehnung bei gegebener Mächtigkeit begrenzt sein, während sie zwischen Salzstrukturen in tektonisch ruhigen Teilschollen sehr große Gebiete erfassen kann. Hydraulische Potenzialbringer im Hangenden der Unterkreide-Tongesteine sind in einigen Regionen in kalkigen Oberkreide-Schichten oder, bei Schichtausfall der Oberkreide, in sandigen Tertiär- bzw. Quartär-Schichten möglich. Sie können aber auch fehlen, wenn z.B. die Unterkreide-Tongesteine an der Oberfläche anstehen oder nur von tonigen Tertiär- oder Quartär-Schichten überdeckt sind. Daher ist u.E. eine Gesamtbewertung dieses großen Teilgebietes nach den Indikatoren und damit auch des gesamten Kriteriums 2 nicht sinnvoll möglich. Gleiches gilt für alle anderen großen Teilgebiete. Der Ansatz der BGE, die Indikatoren zum jetzigen Verfahrensstand pauschal mit „*günstig*“ zu bewerten, ist jedoch nachvollziehbar, da dadurch kein Ausschluss von Gebieten erfolgt.

2.8 Teufe der oberen Begrenzung des ewG

Der Indikator „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]“ bewertet in drei Wertungsgruppen die Tiefe der Obergrenze eines ewG. Hier sind im weiteren Verfahren insbesondere folgende Punkte von Bedeutung:

- In Norddeutschland treten zahlreiche glaziale Rinnen auf, die z.T. über 500 m tief in den Untergrund eingeschnitten sind. Da die Entstehung glazialer Rinnen mit vergleichbarer Tiefe auch in zukünftigen Eiszeiten prinzipiell möglich ist, sollte dies bei der Bewertung berücksichtigt werden.
- Die drei angegebenen Wertungsgruppen lassen vermuten, dass mit zunehmender Tiefe günstigere Verhältnisse erwartet werden können. Jedoch treten mit zunehmender Tiefe höhere Temperaturen und Gebirgsdrücke auf, so dass in zu großen Tiefen wieder ungünstigere Verhältnisse im Hinblick auf z. B. Bau, Betrieb und Rückholbarkeit auftreten können. Zudem sind wirtsgesteinspezifische Unterschiede zu beachten.

2.9 „Potenzialbringer“ in identifizierten Gebieten im Tongestein

In BGE (2020) wird auf S. 122, Abs. 1 zum Indikator „Potenzialbringer“ ausgeführt: *„Eine abschließende Bewertung der identifizierten Gebiete im Tongestein nach dem Indikator „Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs-/Wirtsgesteinkörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet“ ist zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund fehlender Detailinformationen nicht sinnvoll möglich. Aus diesem Grund erfolgt die Bewertung für alle identifizierten Teilgebiete zum jetzigen Zeitpunkt mit „günstig“.*

Diese Einschätzung ist in der jetzigen frühen Phase des Verfahrens nachvollziehbar.

2.10 Kristallin in Niedersachsen

Das Wirtsgestein Kristallin wurde von der BGE in Niedersachsen nur im Teilgebiet 012_01TG_198_01IG_K_g_RHE in Form des Brockenplutons bzw. Brockengranits identifiziert. Der Brockengranit intrudierte diapirartig synorogen während der variszischen Gebirgsbildung in die rhenoherzynen Gesteine. Die nachfolgenden Anmerkungen zur Methodik und Anwendung der Indikatoren zu Kriterium Anlage 2 beziehen sich deshalb nur auf Plutonite als Wirtsgestein:

- „Barriermächtigkeit“: Der Brockengranit steht an der Tagesoberfläche an, d.h. das Wirtsgestein ist gleichzeitig auch Barrieregestein. Nach bisherigem Kenntnisstand ist Granitgestein aufgrund seiner Erosionsresistenz und im Allgemeinen geringen Gebirgsdurchlässigkeit zwischen Tagesoberfläche und ewG als Barrieregestein einzustufen, so dass die Bewertung der BGE mit „günstig“ nachvollziehbar ist.
- „Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“: Der Brockenpluton ist ein diapirartiger Intrusionskörper, der einen ewG allseitig umschließen könnte. Die Bewertung des Indikators mit „günstig“ ist daher nachvollziehbar.
- „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]“: Der Brockengranit steht von der Tagesoberfläche bis zur Suchtiefe von 1.500 m an, so dass ggfs. ein ewG zwischen 300 m und 1.500 m ausgewiesen werden könnte. Daher ist die Bewertung der BGE mit „günstig“ zunächst nachvollziehbar. In wieweit Entlastungsklüfte die Barrierewirkung im oberflächennahen Bereich herabsetzen, kann anhand der Datenlage z.Z. nicht eingeschätzt werden. Aus Skandinavien ist bekannt, dass eine verstärkte Klüftigkeit (Entlastungsklüfte) bis etwa 200 m Tiefe auftritt.

- „Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)“:
Das StandAG gibt keine konkrete Größe für die Fläche des Endlagers vor. In der Begründung zum
Gesetzentwurf wird für Kristallingestein eine Fläche von mindestens 6 km² angegeben (BT-Drs.
18/11398, S. 71). Die maximale Ausdehnung des potentiellen Wirtsgesteins „Brockengranit“
beträgt nach geologischer Karte GÜK250 mehr als 150 km² (ca. 25-fache Größe des Mindest-
flächenbedarfs). Daher ist die Einordnung dieses Indikators für das Teilgebiet
012_01TG_198_01IG_K_g_RHE mit „*günstig*“ nachvollziehbar.

3 Zu Anlage 3 (zu StandAG § 24 Absatz 3) „Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“

3.1 Vorbemerkung

Das Kriterium betrachtet die räumliche Charakterisierung der wesentlichen geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten, insbesondere des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Die beiden bewertungsrelevanten Eigenschaften dieses Kriteriums sind die „Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ sowie die „Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (BGE 2020a). Diese werden gemäß StandAG (Anlage 3) anhand von vier Indikatoren bewertet:

1. Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich
2. Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften
3. Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit
4. Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)

Die Bewertung der identifizierten Gebiete in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tongestein erfolgte individuell. Die Bewertung der identifizierten Gebiete im kristallinen Wirtsgestein erfolgte auf Basis des in BGE (2020b) und BGE (2020k) dargestellten Referenzdatensatzes für kristallines Wirtsgestein (BGE 2020). Im Ergebnis wurde dieses Kriterium für die identifizierten Gebiete in den Wirtsgesteinen Tongestein und Steinsalz anhand des am schlechtesten bewerteten Indikators bewertet.

3.2 Bewertung nach geologischer Gesamtsituation

Die Abwägungskriterien und ihre Indikatoren sollten grundsätzlich nicht nur isoliert, sondern auch gekoppelt betrachtet werden (siehe auch unsere Ausführungen zu StandAG Anlage 2)

Die Gesamtbewertung des Kriteriums wird hier anhand des am schlechtesten bewerteten Indikators vorgenommen (BGE 2020, S. 123). Diese pauschale Herangehensweise ist aus geowissenschaftlicher Sicht nicht nachvollziehbar, wenn die Koppelung von Indikatoren und Kriterien eine Rolle spielen soll. Für eine Gesamtbewertung sollte die Betrachtung und Abwägung aller Indikatoren notwendig sein. Bei der Bewertung von Gebieten sollte daher ein größerer Fokus auf die geologische Gesamtsituation gelegt werden und nicht nur auf eine isolierte Bewertung einzelner Indikatoren.

3.3 Ermittelbarkeit von Gesteinstypen und deren Eigenschaften

In der Beschreibung des Kriteriums sowie den zugehörigen bewertungsrelevanten Eigenschaften wird auf die Bedeutung der zuverlässigen Ermittelbarkeit von Gesteinstypen und deren Eigenschaften und deren Übertragbarkeit auf einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) hingewiesen. So bedingt beispielsweise eine „nicht zuverlässig erhebbar[e]“ Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich beim Indikator 1 eine Bewertung mit „ungünstig“. Aufgrund der von der BGE angewandten pauschalen Bewertungsansätze und der verwendeten Datenlage fand dieser Aspekt erst wenig Anwendung, es wurde daher grundsätzlich mit „günstig“ bewertet. Für die weiteren eingrenzenden Verfahrensschritte stellt sich insbesondere bei den Salzstrukturen die Frage, wie hiermit bei einer weiteren Abwägung umgegangen werden soll und wie die Informationen zur Bewertung dieses Indikators ermittelt werden können. Derzeit ist nicht ersichtlich, ab wann nicht

zuverlässig ermittelbare Eigenschaften zu einer „*ungünstigen*“ Bewertung und ggf. zu einem Ausschluss führen.

3.4 Bewertungen großer Gebiete vs. ewG

Das Kriterium 3 mit seinen vier Indikatoren wird in dieser Phase des Verfahrens von der BGE nicht auf den ewG angewendet, sondern auf die sehr großen identifizierten Gebiete. Dadurch kann zunächst nur eine pauschale „*günstige*“ Bewertung der Indikatoren vorgenommen werden. Dies unterstellt, dass innerhalb der großen identifizierten Gebiete „*günstige*“ Bereiche erwartet werden können, in denen ggfs. ein ewG realisiert werden könnte. Das ist zunächst nachvollziehbar.

3.5 Bewertung für Steinsalz

In BGE (2020ag) und BGE (2020ah) wird bei den detaillierter beschriebenen Bewertungen der einzelnen identifizierten Gebiete beim Kriterium 3 für das Wirtsgestein Steinsalz (stratiform und steil) einleitend geschrieben: „*Die Bewertung der Indikatoren erfolgte anhand von Fachliteratur*“. Den Anspruch einer „*individuellen Bewertung anhand gebietsspezifischer Daten*“ erfüllt eine solche Herangehensweise nur sehr bedingt. Bei Salzformationen in steiler Lagerung beziehen sich die Bewertungen der einzelnen Indikatoren sowohl bei reinen Zechstein-Strukturen als auch bei Doppelsalinen stets auf dieselbe Literatur und sind nach überschlüssiger Durchsicht bei den Einzelbewertungen der Strukturen nahezu wortgleich und nicht individuell differenziert betrachtet. Der einzig erkennbare Unterscheidungsschritt liegt bei der Bewertung der Doppelsalinen vor, die gemäß ihrer Internbautypen unterschieden wurden. Sobald ein Internbautyp 1 oder 3 vorliegt, wurden die Indikatoren 1, 2 und 4 dann pauschal mit „*bedingt günstig*“ bewertet.

3.6 Bewertung der Doppelsalinen

Die BGE unterscheidet in BGE (2020k, S. 47) zwischen Zechsteinsalinen und Rotliegendesalinen und führt für beide jeweils separate Bewertungen durch. Daraus folgt eine unterschiedliche Bewertung von Zechstein-Strukturen und Doppelsalinen. Bei Zechstein-Strukturen blieb der Internbau mangels Daten bisher unberücksichtigt. Doppelsalinen hingegen wurden nach Internbautyp klassifiziert (gemäß InSpEE-DS (BGR et al. 2020)) und z.T. unterschiedlich bewertet. Typ 2-Doppelsalinen nach (BGR et al. 2020) wurden wegen definitionsgemäß großem Anteil von Zechsteinsalinar über Rotliegend wie reine Zechstein-Strukturen bewertet. Es findet jedoch keine Auseinandersetzung zur Zuverlässigkeit bzw. Belastbarkeit der Einteilung zu den Internbautypen aus BGR et al. (2020) statt. Auf Grundlage dieser Festlegung auf einen Internbautyp könnten Entscheidungen getroffen worden sein, die zu Ausschlüssen von identifizierten Gebieten geführt haben. Beim Projekt InSpEE-DS ging es um eine Potenzialabschätzung für Wasserstoff- und Druckluftspeicherung in Salzkavernen. In welcher Weise bei dieser Abschätzung Vorfestlegungen getroffen wurden, z.B. die Betrachtung nur onshore, oder Konservativitäten eingebaut wurden, die ggf. von der BGE übernommen wurden, ist nicht ersichtlich und kann nicht nachvollzogen werden.

3.7 Tektonische Überprägung bei Salzstrukturen

Für das „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ erfolgte bei steilstehenden Salzstrukturen keine unterschiedliche Bewertung. Dieser Indikator ist daher nicht ausschlaggebend für die Gesamtbewertung bei steilstehenden Salzstrukturen (BGE 2020k, S.57). BGE bewertet alle steilstehenden Salzformationen für diesen Indikator mit „*bedingt günstig*“, da „*Salzstöcke im Zuge ihrer Entstehung tektonische Prozesse erfahren haben, welche z.B. zur Verfaltung der beteiligten Gesteine*

geführt hat“. Diese pauschale Bewertung ist für die Deckgebirgsschichten oberhalb des Wirtsgesteins sicherlich relevant und zunächst im Grundsatz nachvollziehbar, auch wenn die Ausprägung der tektonischen Beanspruchung des Deckgebirges stets standortspezifische Unterschiede aufweist. Bezogen auf das Wirtsgestein als Bestandteil der „geologischen Einheit“ ist die pauschale Abwertung in die Bewertungsgruppe „bedingt günstig“ nicht nachvollziehbar. Die Prozesse der Halotektonik sind bei Salzstrukturen weniger ein „Makel“ als vielmehr die Grundvoraussetzung zur Entstehung dieser Strukturen und somit auch Grundvoraussetzung für die Entstehung der in ihnen vorkommenden großvolumigen „homogenisierten“ Steinsalzbereiche (Salzbrekzien), welche im Zuge der Wirtsgesteinsausweisung in Salzformationen gesucht werden. Bei der Bewertung wäre u.E. eine Differenzierung zwischen den Deckgebirgsschichten oberhalb des Wirtsgesteins und dem Wirtsgestein selbst angemessen.

3.8 Kristallin

Die BGE bewertet die identifizierten Gebiete im kristallinen Wirtsgestein des Kriteriums 3 anhand von Referenzdatensätzen. Alle Indikatoren wurden dabei pauschal mit „günstig“ bewertet. Bezogen auf das einzige niedersächsische Teilgebiet 012_01TG_198_01IG_K_g_RHE (Brockenpluton bzw. Brockengranit) ist dies aus unserer Sicht aus folgenden Gründen nachvollziehbar:

- Die Variationsbreite der Eigenschaften des Brockengranits ist aufgrund seiner magmatischen Genese vergleichsweise homogen.
- Beim Brockengranit handelt es sich mit etwa 150 km² im Vergleich zur Endlagerfläche von 6 km² um eine große Fläche mit einem weitgehend einheitlichen Gesteinstyp, so dass günstige räumliche Verhältnisse für die Realisierung eines ewG erwartet werden können.
- Nach der Kristallisation des Brockengranits hat er seit der Oberkreide bis zum Pliozän insgesamt eine Hebung von etwa 6 km erfahren. Die bisherigen tektonischen Prozesse haben nach GÜK250 (BGR 2019) und GK25 (NIBIS-Kartenserver) nicht dazu geführt, dass der Brockengranit durch größere Störungen kleinräumig zerlegt wurde.
- Aufgrund seiner Genese - Kristallisation aus einer granitischen Gesteinsschmelze - ist zu erwarten, dass die Variationsbreite der Gesteinsfazies gering ist.

4 Zu Anlage 4 (zu StandAG § 24 Absatz 3): „Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse“

4.1 Vorbemerkung

Die Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG umfasst das „Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse“ von geologischen Merkmalen, die sich in der Vergangenheit über möglichst lange Zeiträume nicht wesentlich verändert haben. Die Anlage 4 ist mit drei Indikatoren hinterlegt:

1. Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat
2. Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat
3. Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat

Jeder Indikator wird als

1. „günstig“ bewertet, wenn seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentliche Änderung des betreffenden Merkmals aufgetreten ist,
2. als „bedingt günstig“, wenn seit mehr als einer Million, aber weniger als zehn Millionen Jahren keine solche Änderung aufgetreten ist, und
3. als „ungünstig“, wenn innerhalb der letzten eine Million Jahre eine solche Änderung aufgetreten ist.

Für diese Indikatoren wurden identifizierte Gebiete in stratiformen Steinsalzformationen und Tongestein individuell auf Basis von im Wesentlichen Fachliteratur sowie von Informationen, welche im Zuge der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen erarbeitet wurden, bewertet (BGE 2020). Identifizierte Gebiete des kristallinen Wirtsgesteins und Salzformationen in steiler Lagerung wurden nach wirtsgesteinsspezifischen Referenzdatensätzen bewertet. BGE (2020, S. 124). *„Die Bewertung dieses Kriteriums entspricht der Bewertung des am schlechtesten bewerteten Indikators“* (BGE 2020, S. 124).

Für alle drei Wirtsgesteine wurden alle drei Indikatoren mit „günstig“ bewertet. Da mit Ausnahme des kristallinen Teilgebietes die identifizierten Gebiete noch sehr groß bzw. zahlreich sind und noch sehr wenig wirtsgesteinsspezifische und regionalgeologische Detailinformationen vorliegen, ist die pauschale Bewertung mit „günstig“ zunächst nachvollziehbar.

4.2 Bewertung des Kriteriums

Die Auslegung der BGE, dass die schlechteste Bewertung eines Indikators der Gesamtbewertung entspricht, kann ggfs. zu einem vorzeitigen Ausschluss von identifizierten Gebieten kommen, weil nur die zeitliche Veränderlichkeit, nicht aber die daraus resultierenden positiven oder negativen Einflüsse auf die Indikatoren bewertet werden (BGE 2020a, S. 88). Dieses Vorgehen würde u. E. dazu führen, dass selbst bei einer positiven Veränderung eines Indikators eine negative Gesamtbewertung des Kriteriums bestehen bliebe.

4.3 Langfristig zu betrachtende Faktoren

Je nach Wirtsgestein sind unterschiedliche Faktoren zu bewerten, die die zukünftige Entwicklung eines Endlagers beeinflussen und die unter Umständen an einem Standort erwartet werden können. Dazu gehören geologische Faktoren wie beispielsweise Subrosion, Erosion, glaziale Rinnen, Inlandsvereisung, kryogene Klüfte, Permafrost, Transgression und Hebungsprozesse. Diese Betrachtungen

wurden bislang durch die BGE nur sehr vereinzelt und überschlägig bei Anlage 4 vorgenommen. Viele der Faktoren spielten jedoch in den letzten 10 Millionen Jahren bereits eine bedeutende Rolle und sollten frühzeitig in der Abwägung Berücksichtigung finden.

4.4 Bewertung von Steinsalzgebieten

Für „Steinsalz in steiler Lagerung“ und für „stratiforme Steinsalzformationen“ wurden alle Salzstrukturen, die ganz oder teilweise in Niedersachsen liegen, bezüglich des Abwägungskriteriums 4 mit „*günstig*“ bewertet. Damit geht BGE davon aus, dass in den letzten 10 Millionen Jahren keine wesentlichen Änderungen der 3 Indikatoren stattgefunden haben. Dies wird vor allem mit dem Ende der Hauptsalzaufstiegsbewegungen im Tertiär begründet (BGE 2020b). Diese allgemeine Annahme kann zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Verfahren so generell zunächst getroffen werden. Im Detail ist im weiteren Verfahren jedoch wesentlich mehr zu berücksichtigen. Bei den identifizierten Gebieten mit „Steinsalz in steiler Lagerung“ ist beispielsweise die Menge der noch für den Salzaufstieg (Diapirismus) zur Verfügung stehenden und mobilisierbaren Salzmassen stark unterschiedlich. Im Einzelfall können durchaus für die nächste eine Millionen Jahre relevante Aufstiegsbeträge erreicht werden. Berechnete Aufstiegsraten am Beispiel des Salzstock Gorleben werden für den Zeitraum Miozän bis Quartär mit durchschnittlich 0,07 mm/Jahr angegeben, woraus sich ein Gesamtwert von 70 m für eine Million Jahre ergibt (GRS 2012). Zudem sind für Salz weitere Prozesse zu betrachten, dazu gehören u.a. Erosion, Subrosion, Vereisung und Rinnenbildung.

4.5 Bewertung von Tongesteinsgebieten

Die Indikatoren des Abwägungskriteriums 4 sind auf den ewG anzuwenden (BGE 2020 a), dessen Lage zum derzeitigen Verfahrensstand jedoch nicht bekannt ist. Stattdessen *„erfolgt daher eine Bewertung der Indikatoren für die identifizierten Gebiete anhand der jeweiligen endlagerrelevanten Gesteinsabfolge oder -formation, welche im Rahmen der Anwendung der Mindestanforderungen ausgewiesen wird“* (BGE 2020 a, S. 88). Die Indikatoren für die Tongesteinsgebiete in Niedersachsen wurden alle mit „*günstig*“ bewertet. Das ist in diesem frühen Schritt des Verfahrens zunächst grundsätzlich nachvollziehbar.

Eine Bewertung der beiden ersten Indikatoren kann aus unserer Sicht allerdings für die großen Tongesteinsgebiete in Niedersachsen nicht belastbar durchgeführt werden. Veränderungen der Mächtigkeit und der Ausdehnung der ausgewiesenen Tongesteinsformationen haben in den letzten 10 Millionen Jahren nicht flächendeckend über das gesamte ausgewiesene Gebiet stattgefunden, sondern waren – wenn sie stattgefunden haben – lokal begrenzt. So sind beispielsweise Veränderungen der Mächtigkeit und Ausdehnung durch Erosionsprozesse möglich. Diese könnten z. B. durch die Bildung glazialer Rinnen verursacht worden sein oder im Nahbereich von Salzstrukturen während halotektonischer Bewegungen stattgefunden haben. Es ist zu erwarten, dass vergleichbare Prozesse auch zukünftig eher lokale Ausmaße haben werden. Es sollten daher im weiteren Verfahren Bereiche identifiziert werden, in denen diese Prozesse im regionalgeologischen Maßstab erwartet werden können.

4.6 Bewertung von Kristallingebieten

In Niedersachsen wurde von der BGE nur ein Teilgebiet 012_01TG_198_01IG_K_g_RHE (Brockenpluton bzw. Brockengranit) als kristallines Wirtsgestein identifiziert. Die BGE geht davon aus, dass aufgrund der allgemeinen Erosionsresistenz und generell geringen Gebirgsdurchlässigkeit ein ewG im

Brockenpluton keine wesentliche Veränderung in Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit in den nächsten 1 Mio. Jahren erfährt. Diese Einschätzung halten wir für nachvollziehbar.

5 Zu Anlage 6 (zu StandAG § 24 Absatz 4): „Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“

5.1 Vorbemerkung

Im Standortauswahlgesetz (StandAG) werden in Anlage 6 für die Bewertung „der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ zwei Kriterien mit mehreren Indikatoren genannt:

- Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit,
 - Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit / repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit
 - Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen
 - Duktilität des Gesteins
- Rückbildbarkeit von Rissen
 - Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung
 - Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung

5.2 Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit

Hier wird die Vulnerabilität des Wirtsgesteins vor Ort gegenüber Klufthildung aufgrund exogener und endogener Beanspruchung verstanden, d.h. je kleiner der Quotient aus Gebirgsdurchlässigkeit und Gesteinsdurchlässigkeit, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine zukünftige Beanspruchung im Gestein zu einer erhöhten Fluidwegsamkeit durch Klufthildung führt.

Für alle Gesteine wird der Indikator wegen des Fehlens von Standortdaten auf der Basis von Referenzdaten bewertet.

Für Tongestein und Kristallin wird angenommen, dass ein „ausreichend großer Bereich für einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich mit geringer oder keiner Klüftung existiert. Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit können damit die gleiche Größenordnung haben“ (BGE2020b, S. 82) und das Kriterium wird als „günstig“ bewertet.

Salzgebirge wird als unverritz betrachtet und aufgrund seiner duktilen Eigenschaften werden keine Klüfte erwartet. Demnach wird angenommen, dass für die Gebirgsdurchlässigkeit und die Gesteinsdurchlässigkeit Werte in der gleichen Größenordnung liegen, so dass der Indikator als „günstig“ zu bewerten ist.

Bewertung

Aufgrund des Fehlens von ortsbezogenen Daten wird für alle Wirtsgesteine die Annahme getroffen, dass ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich mit geringer oder keiner Klüftung gefunden wird. Eine weitergehende Konkretisierung der „geringen Klüftung“ wird allerdings nicht gegeben. Die Einstufung des Indikators als „günstig“ ist mit dieser Annahme begründet. Das ist zunächst nachvollziehbar.

5.3 Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen

In BGE (2020b) sind in den Kapiteln 4.3.3, 5.5.3 und 6.4.3 die Bereiche benannt, in denen Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen vorhanden ist. Sie sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

| Erfahrungsbereich | Tongestein, BGE (2020b), Kap. 4.3.3, S. 40 | Kristallin, BGE (2020b), Kap. 5.5.3, S. 82 | Salzgestein, BGE (2020b), Kap. 6.4.3, S. 115 |
|---|--|--|--|
| rezente Existenz als wasserlösliches Gestein | | sehr geringe Lösungsraten | |
| fossile Fluideinschlüsse | | Nur bedingt | |
| unterlagernde wasserlösliche Gesteine | | | Salz- und Tonformationen im Liegenden |
| unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe | Abdeckende Schichten für Kohlenwasserstoff-Vorkommen | | Fallenstrukturen für Kohlenwasserstofflagerstätten |
| Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken | Steinkohlenbergbau, Salzbergbau, Depo-niebau | | |
| Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung | | | |
| Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien | | | Kavernen |
| Ergebnis | Zwei erfüllt, Günstig | Eines erfüllt, Günstig | Drei erfüllt: Günstig |

Tab.1: „Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen“ (zusammengestellt aus BGE (2020b))

Laut StandAG ist der Indikator als „günstig“ zu bewerten, wenn „die Gebirgsformation / der Gesteinstyp [...] anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert [wird], auch unter geogener oder technogener Beanspruchung.“ Der Indikator wird von der BGE deshalb für alle Wirtsgesteine als „günstig“ eingestuft.

Bewertung

Der Indikator „Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen“ wurde von der BGE bearbeitet und die Erfahrungsbereiche, die im Indikator genannt sind, geprüft. Da der Indikator für alle Wirtsgesteine als „günstig“ identifiziert wird, hat er keinen Einfluss auf die Bewertung der identifizierten Gebiete.

Über die im Bericht genannten Bereiche hinaus sind in der Forschung noch weitere Erfahrungen vorhanden, z.B. über „fossile Fluideinschlüsse“ im Tongestein (Porenwasser) und Salzgestein, deren Bestimmung eine wichtige Untersuchung zur Festlegung des Grundwasser- bzw. Fluidalters ist. Diese Untersuchungen sollten im weiteren Verfahren berücksichtigt werden.

5.4 Duktilität des Gesteins

Laut StandAG, Anlage 6, ist dieser Indikator nur bei einem Vergleich von Standorten vorgesehen und wird in dieser Phase des Suchprozesses nachvollziehbar nicht angewendet.

5.5 Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung

Nach Lux, K.-H. und Eberth, S. (2002), S. 82, sind für die Bewertung dieses Indikators „Angaben erforderlich [...], die erst im späteren Rahmen der Endlagerplanung vorliegen können.“ Die BGE hat deshalb „vorerst eine qualitative Einschätzung des Gesteinsverhaltens, basierend auf den bisher im Bergbau und der Forschung gemachten Erfahrungen, angewandt.“ (siehe Kap. 4.3.4, S. 42, Kap. 5.5.4, S. 84 und Kap. 6.4.4, S. 115). Die qualitative Einschätzung des Gesteinsverhaltens kommt für die Wirtsgesteine zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Für Tongestein „günstig“, für Kristallin „nicht günstig“, für Steinsalz „günstig“. Die Bewertung für Kristallin wird damit begründet, dass infolge der hohen Festigkeit der Mineralkörner kein vollständiges Schließen von Rissen mit der notwendigen Verringerung der Sekundärpermeabilität zu erwarten ist.

Bewertung

Das Ergebnis der wirtsgesteinsspezifischen Betrachtung dieses Kriteriums ist aus fachlicher Sicht plausibel. Allerdings kommen die Autoren in Lux, K.-H. und Eberth, S. (2002), S. 83, exemplarisch zu dem Ergebnis, dass „feinklastische Gesteine (z.B. Tongesteine und Tone) mit elastisch-sprödem bis elasto-plastisch-duktilen Materialverhalten [...] begrenzt bis ausgeprägt zur Risschließung [neigen].“ Diese Bandbreite des Materialverhaltens sollte in den weiteren Verfahrensschritten berücksichtigt werden.

5.6 Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung

Tatsächliche Rissverheilung wird für Tongestein, BGE (2020b) Kap. 4.3.4, S. 43, vorsichtig abwägend eingeführt und verwendet. Tatsächlich ist dies auch mit noch größerer Vorsicht geboten als hier beschrieben. Die OECD definiert in dem OECD-Clay Club Report 2010 (OECD (2010)), S. 25, „healing“ derart, dass es nur dann auftritt, wenn die Risse völlig ihr „Riss-Gedächtnis“ verloren haben. Sollte das Gestein wieder Risse bilden, dann nicht bevorzugt an dieser vorher gerissenen Stelle. In dem OECD-Clay Club Report 2010 (OECD (2010)) werden Stand von Wissenschaft und Technik aller einschlägigen tonigen Wirtsgesteine auf insg. 312 Seiten auf „sealing“ und „healing“ überprüft. Nur beim plastischen Boom Clay wird spekuliert, ob einige der Versuchsergebnisse evtl. doch Anzeichen von „healing“ zeigen könnten. Für Opalinuston und COX Clay finden sich im OECD-Clay Club Report 2010 keine Hinweise mehr auf „healing“, stattdessen wird „sealing“ angenommen.

Bewertung

Die vorgenannten Aspekte werden mit einer Bewertung „günstig“ für Tongestein nicht hinreichend abgebildet.

5.7 Zusammenfassende Bewertung

- Für alle Teilgebiete eines Wirtsgesteins wird dieses Kriterium gleich bewertet, da keine ortsspezifischen, sondern wirtsgesteinsspezifische Referenzdaten verwendet werden. Die Bewertung für alle Teilgebiete in Ton- und Salzgestein ist „günstig“, wogegen die Bewertung dieses Kriteriums für Teilgebiete im Kristallin „bedingt günstig“ ausfällt.
- Die Indikatorbewertungen zu den hier geprüften Kriterien (siehe oben) sind in allen Teilgebieten mit Wirtsgestein Ton identisch, obwohl bekannt ist, dass deutliche Unterschiede in den Eigenschaften (Mineralogie, Lithologie, Fazies usw.) vorhanden sind.
- Für die Bewertungen der Indikatoren „Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung“ und „Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung“ sollte der

Stand von Wissenschaft und Technik überprüft werden. Laut dem OECD-Clay Club Report 2010 (OECD (2010)) zeigen die Tongesteine der meisten untersuchten Standorte kein „*healing*“. Die möglichen Bandbreiten werden mit einer generellen Bewertung „*günstig*“ für Tongestein nicht hinreichend abgebildet.

6 Zu Anlage 8 (zu StandAG § 24 Absatz 5): „Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit“

6.1 Vorbemerkung

Das Kriterium zu Anlage 8 (zu § 24 Absatz 3, StandAG (2017)): „Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit“ wird von der BGE im derzeitigen Verfahrensschritt ausschließlich auf Grundlage der wirtsgesteinsspezifischen Referenzdatensätze bewertet (BGE (2020), S. 125).

Folgende Indikatoren sind lt. Anlage 8, StandAG, zu betrachten:

1. Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung
2. Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen.

6.2 Indikator 1: wärmeinduzierte Sekundärpermeabilitäten

Für die Auswertung dieses Indikators bezieht sich die BGE auf die Ergebnisse des Projekts RESUS, siehe z.B. BGE (2020a, S. 108, Kap. 7.8.3.2). In RESUS wird in Alfarrá et al. (2020), S. 160, exemplarisch für das Wirtsgestein Salz festgestellt, dass durch die Volumenexpansion des erwärmten Gebirgsbereichs in mehreren Hundert Metern Entfernung Zugspannungen auftreten können, während in geringerer Entfernung von den Einlagerungshohlräumen die Drucknormalspannungen zunehmen und dies hinsichtlich der mechanischen Unversehrtheit des Gesteins zu einer Verbesserung des Spannungszustandes führt. Deshalb formuliert die BGE, dass unter der Voraussetzung eines positiven thermischen Expansionskoeffizienten der Indikator „Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten“ als „*günstig*“ zu bewerten ist.

In RESUS (Alfarrá et al. (2020), S. 160) wird allerdings auch darauf hingewiesen, dass es in porösen und fluidgesättigten Gesteinen durch die thermisch induzierte Fluidexpansion zu einem Anstieg des Porenwasserdrucks kommen kann. Dies würde zu einer Verringerung der effektiven Druckspannungen führen und den Spannungszustand hinsichtlich Dilatanz- und Festigkeitsgrenze ungünstig beeinflussen.

Die hydromechanische Kopplung zwischen dem Druck eines potentiell vorhandenen Fluids und den Gebirgsspannungen wird für die Wirtsgesteinstypen Kristallingestein und Tongestein durch die BGE in BGE (2020b) angesprochen, jedoch bei der Bewertung dieses Kriteriums im vorliegenden Zwischenbericht nicht weiter betrachtet, da sie von verschiedenen, lokationsabhängigen Einflussgrößen abhängt und zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll auszuwerten ist.

Da standortspezifische Kennwerte in dem Schritt 1 der Phase I noch nicht vorliegen, werden wirtsgesteinsspezifische Referenzdatensätze (Tabellen 20, 41 und 58 in BGE (2020b)) verwendet. Bei den Referenzdatensätzen sind für alle Wirtsgesteine die thermischen Expansionskoeffizienten positiv, so dass dieser Indikator für alle Wirtsgesteine als „*günstig*“ bewertet wird. Diese Einschätzung ist im derzeitigen Verfahrensschritt nachvollziehbar.

6.3 Indikator 2: Mineralumwandlungen

Steinsalz: Da (reines) Steinsalz kein Kristallwasser, sondern nur intra- und interkristalline Lösungseinschlüsse enthält, ist bei höheren Temperaturen - bis auf eine Migration der Lösungseinschlüsse - keine Mineralveränderung zu besorgen, daher ist eine Bewertung mit „*günstig*“ nachvollziehbar.

Tongestein: Eine Erwärmung von Tongestein über die Paläomaximaltemperatur hinaus kann zur Alteration organischer Substanz führen. Hierbei entstehende Kolloide können die Sorptionsfähigkeit eines Gesteins gegenüber Radionukliden erheblich reduzieren. Deshalb ist es aus unserer Sicht wichtig, das Abwägungskriterium „Temperaturverträglichkeit“ nicht alleinstehend, sondern gekoppelt mit dem Kriterium „Rückhaltevermögen“ Anlage 9 zu betrachten.

Die BGE geht davon aus, dass das Tongestein „trocken“ ist, so dass eine Alteration bzw. Mineralumwandlung weitestgehend auszuschließen ist. Diese Annahme ist jedoch nicht realistisch, so dass die Bewertung mit „*günstig*“ nicht plausibel ist.

Kristallin: Die Minerale aus denen Kristallingestein aufgebaut ist, stehen bei ihrer Kristallisation in großer Tiefe - bei großen Drücken und hohen Temperaturen - im thermodynamischen Gleichgewicht. Werden sie durch tektonische Vorgänge aus diesem Druck-Temperaturbereich z.B. an die Tagesoberfläche gehoben, gelangen sie in einen Temperaturbereich, bei dem sie nicht mehr im thermodynamischen Gleichgewicht stehen. Eine Alteration bzw. Verwitterung von Kristallingestein findet praktisch nur bei Anwesenheit von Wasser als Lösungsmittel statt. Nach Bucher, K. and I. Stober (2010) laufen diese Prozesse jedoch extrem langsam ab. Die Temperaturstabilität von Kristallingestein hinsichtlich Mineralumwandlung mit „*günstig*“ zu bewerten, ist aus unserer Sicht für den Schritt 1 der Phase I plausibel. Für die zwingend notwendigen Materialien der geotechnischen Barrieren (Bentonit, Hauptkomponenten sind quellfähige Tonminerale) besteht jedoch eine starke Abhängigkeit der schutzwirksamen Eigenschaften von der Temperatur.

6.4 Zusammenfassende Bewertung

Die Bewertung des Kriteriums auf der Grundlage von wirtsgesteinsspezifischen Referenzdatensätzen ist grundsätzlich nachvollziehbar, da gebietsspezifische Informationen zu den einzelnen Indikatoren dieses Kriteriums noch nicht in ausreichendem Maße vorliegen.

Für die Bewertung des Indikators 1 bezieht sich die BGE auf das Projekt RESUS (*„Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“*). Die dort durchgeführten Sicherheitsuntersuchungen zeigen, dass der Temperaturanstieg zu einem hinsichtlich der Gesteinsschädigung günstigeren Spannungszustand im Nahbereich der Einlagerungshohlräume führt und dort bei keinem der Wirtsgesteine eine Erhöhung der Permeabilität zu erwarten ist.

Der Indikator 2 wird für die Wirtsgesteine Steinsalz und Kristallin aufgrund der Temperaturstabilität der Minerale als „*günstig*“ bewertet. Bei Tongestein ist für Temperaturen oberhalb der Paläomaximaltemperatur insbesondere bei vorhandener Feuchtigkeit eine Alteration organischer Substanzen zu erwarten.

Die Annahme der BGE, von „*trockenem*“ Wirtsgestein (Tongestein) für die Bewertung der Temperaturstabilität auszugehen, ist aus unserer Sicht unrealistisch, so dass die günstige Bewertung des Indikators 2 hier nicht nachvollzogen werden kann.

Die Bewertung des Kriteriums Temperaturverträglichkeit wurde für alle Wirtsgesteine aufgrund der beiden Indikatoren mit „*günstig*“ eingestuft. Für die Wirtsgesteine Salzgestein und Kristallin ist dies nachvollziehbar. Für Tongestein ist die Bewertung „*günstig*“ nur plausibel, solange die Paläomaximaltemperatur nicht überschritten wird.

7 Zu Anlage 11 (zu StandAG § 24 Absatz 5): Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge

7.1 Vorbemerkung

Das Kriterium betrachtet den strukturellen Aufbau und die Zusammensetzung des Deckgebirges und wird gemäß StandAG (Anlage 11) anhand von drei Indikatoren bewertet:

1. Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge
2. Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs
3. keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten

Jeder Indikator besitzt die Wertungsgruppen „*günstig*“, „*bedingt günstig*“ und „*ungünstig*“. Für die Gesamtbewertung des Kriteriums ist „*der am schlechtesten bewertete Indikator maßgebend*“ (BGE 2020, S. 127).

Alle Indikatoren dieses Kriteriums werden auf Basis von gebietsspezifischen Daten für alle identifizierten Gebiete individuell bewertet.

Wir betrachten im Folgenden die Anwendung der Methodik des Kriteriums auf der Grundlage der Auslegung der BGE vom 06.01.2021 (BGE 2020x).

7.2 Allgemeine Anmerkungen

Im StandAG Anlage 11 wird der Begriff „Überdeckung“ mehrfach mit direktem Bezug zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich verwendet: „*Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs*“. Da der einschlusswirksame Gebirgsbereich grundsätzlich einen Teilbereich der Wirtsgesteinsformation darstellt, d.h. Wirtsgestein auch oberhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs vorhanden ist bzw. vorhanden sein kann, erscheint es aus geowissenschaftlicher Sicht nicht sinnvoll, das Wirtsgestein per se nicht als Überdeckung heranzuziehen. Die Auslegung der BGE berücksichtigt nicht, dass das Wirtsgestein selbst, sofern es oberhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in größerer Mächtigkeit vorhanden ist, maßgeblich zu dem lt. Anlage 11 des StandAG zu bewertenden „Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegen direkte oder indirekte Auswirkungen exogener Vorgänge“ beitragen kann.

7.3 Datengrundlagen für die Bewertung des Kriteriums

BGE (2020a), Seite 124: „*In der aktuellen Phase des Standortauswahlverfahrens ist zu erwarten, dass detaillierte Informationen zur geologischen Beschaffenheit des Deckgebirges nicht flächendeckend vorliegen. Es kann daher zum jetzigen Zeitpunkt lediglich eine erste Einschätzung des Deckgebirgszustands erfolgen. Wie in Anwendungsprinzip 7 (siehe Kapitel 2) dargelegt, kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zum jetzigen Zeitpunkt nicht ermittelt werden. Daher erfolgt die Bewertung der Indikatoren für die identifizierten Gebiete anhand der jeweiligen endlagerrelevanten Gesteinsabfolge oder -formation, welche im Rahmen der Anwendung der Mindestanforderungen ausgewiesen wird.*“

Die Bewertung des Kriteriums wird von der BGE auf der Grundlage von geologischen 3D-Modellen vorgenommen (für Niedersachsen der Geotektonische Atlas 3D (GTA3D)), sowie mit den eigens erstellten 3D-Modellen der BGE für Gebiete, in denen zuvor keine 3D-Modelle vorlagen. Ein kleinmaßstäbliches Modell (GTA3D 1:300.000) kann die z. T. sehr komplexen und kleinräumig strukturierten geologischen Verhältnisse, wie sie z. B. in Bereichen von Salzstrukturen oder Störungssystemen auftreten, nur generalisiert und somit eingeschränkt abbilden. Daher können u. E. abschließende Bewertungen zu diesem Kriterium nicht ausschließlich auf der Grundlage von Übersichts-Modellen oder -Karten vorgenommen werden. Bei den Teilgebieten „Steinsalz in steiler Lagerung“ hat die Herangehensweise der BGE z.B. zur Folge, dass, wenn nur „ein Pixel in dem 100 Meter mal 100 Meter Gitter der Auswertung eine „ungünstige“ Bewertung anzeigt, diese für das gesamte identifizierte Gebiet übernommen wird.“ (BGE 2020a, S. 128). Eine punktuelle Information, ermittelt aus großräumigen Übersichts-Modellen und basierend auf „lediglich eine[r] erste[n] Einschätzung“, kann demnach hier dazu führen, dass ein gesamtes identifiziertes Gebiet (das sich bei einigen Salzstrukturen über Zehnerkilometer erstrecken kann) aus dem weiteren Verfahren ausgeschlossen wird. Es bleibt im Zwischenbericht Teilgebiete unklar, welche anderen gebietsspezifischen Informationen zur abschließenden Bewertung des Kriteriums eingeflossen sind.

Das für Niedersachsen verwendete Modell GTA3D ist u. E. für die in der Abwägung nötige regional-geologische Detailbetrachtung nur begrenzt geeignet:

- Der GTA3D ist eine digitale Umsetzung des zweidimensionalen Geotektonischen Atlas von Norddeutschland (Baldschuhn et al. 2001), der zuletzt im Maßstab 1:300.000 im Jahre 2001 veröffentlicht wurde (Aktualitätsstand der Daten ist von 1993). Er basiert zum größten Teil auf Seismik- und Bohrungsdaten der Erdöl- und Erdgasindustrie aus den 70er und 80er Jahren. Diese Erkundungen sind jedoch in der Regel auf die tiefen Zielhorizonte (z.B. im Rotliegenden) ausgerichtet und können u.U. in den höher liegenden Einheiten größere Abweichungen aufweisen. Darüber hinaus sind die stratigraphischen Einheiten meist nur als übergeordnete Einheiten abgebildet. Einige stratigraphische Einheiten, wie beispielsweise der Obere Jura (Malm), liegen nur als zusammengefasste Einheit mit dem Wealden vor, ebenso ist der Mittlere Muschelkalk nur als zusammengefasste Einheit mit dem Oberen Buntsandstein und dem kompletten Muschelkalk vorhanden.
- Im GTA3D selbst gibt es bekannte Modellunzulänglichkeiten, die vor allem aus der Übernahme der Daten aus dem zweidimensionalen Geotektonischen Atlas stammen. Dazu gehören nicht modellierte Störungsflächen, Flächendurchdringungen und geologisch nicht plausible Lagerungsbeziehungen, welche besonders in komplexen geologischen Bereichen zu Unstimmigkeiten führen können (Bombien et al. 2012).

Generell gilt, dass in Bereichen in denen mehr geologische Daten, wie beispielsweise Tiefbohrungen vorliegen, die Aussagekraft der Modelle im Allgemeinen höher ist als in Gebieten, in denen nur wenige Daten vorliegen. Im Detail sollte zunächst der regionale Detaillierungsgrad und die Konsistenz der Modelle geprüft werden, bevor Aussagen zu kleinräumigen Strukturen vorgenommen werden können.

Fazit

Für das Abwägungskriterium 11 wird von der BGE bei der Bewertung von Teilgebieten eine verbal-argumentative Bewertung auf der Basis von 3D-Modellen vorgenommen. Hierbei ist nicht nachvollziehbar, ob eine ortsspezifische Prüfung der Belastbarkeit der von den SGD gelieferten 3D-Modelle (oder den von der BGE selbst erstellten 3D-Modellen) und ggf. weiterer geologischer Daten durch die

BGE stattgefunden hat. Dieser Arbeitsschritt wäre aber nötig, um sicherzustellen, dass Gebiete nicht aufgrund von Modellunzulänglichkeiten, die insbesondere in Bereichen komplexer Geologie durchaus zu erwarten sind, aus dem Verfahren ausscheiden.

7.4 Bewertung von großen Teilgebieten mit heterogenem Aufbau der wirtsgesteinsüberlagernden Schichten

Generell sind die sehr großen Ton-, Kristallin- und stratiformen Steinsalzgebiete kaum, bzw. nur sehr schwer nach Kriterium 11 zu bewerten, da innerhalb dieser großen Gebiete starke Heterogenitäten sowohl in der Mächtigkeit als auch in der Konstellation der wirtsgesteinsüberlagernden Schicht-einheiten möglich sind. So erstreckt sich z. B. das Tongesteinsgebiet des Unteren Jura (Teilgebiet_006_00TG_188_00IG_T_f_ju) über weite Bereiche Niedersachsens und kann sowohl an der Erdoberfläche zutage treten als auch unter Bedeckung von Schichten des Mittleren Jura, des Oberjura, der Unterkreide, der Oberkreide, des Paläogen, des Neogen und des Quartär vorkommen. Dabei können die genannten Schichten vollzählig oder unter Ausfall von stratigraphischen Einheiten in verschiedenen Konstellationen vorkommen. Dementsprechend sind innerhalb von großen Teilgebieten Bereiche mit günstigem als auch Bereiche mit ungünstigem Deckgebirgsaufbau zu erwarten. Eine einheitliche Bewertung der großen Teilgebiete nach Kriterium 11 erscheint daher nicht zielführend.

7.5 Anwendung des Kriteriums auf das Wirtsgestein Steinsalz

Die Bewertung des Kriteriums erfolgt für Steinsalz nach anderen Maßstäben als für Ton- und Kristallin-gestein: *„Ausschlaggebend für die Bewertung von Steinsalz ist ein punktuelles Auftreten „ungünstiger“ Verhältnisse, während für kristalline Wirtsgesteine und Tongesteine ein flächiges Auftreten „ungünstiger“ Verhältnisse ausschlaggebend für die Bewertung ist.“* (BGE 2020, S. 126).

Das punktuelle Auftreten ungünstiger Verhältnisse wird als erfüllt angesehen *„sobald ein Pixel in dem 100 Meter mal 100 Meter Gitter der Auswertung eine ungünstige Bewertung anzeigt“* (BGE 2020a, S. 128), während das flächige Auftreten als erfüllt gilt *„wenn dies für die gesamte Fläche des identifizierten Gebietes erfüllt ist“* (BGE 2020a, S. 130).

Dieses Vorgehen wird damit begründet, dass im Gegensatz zu Ton- und Kristallin-gestein *„Steinsalz wasserlöslich ist und sich dementsprechend der Kontakt des Wirtsgesteins mit grundwasserführenden Horizonten negativ auf den Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs auswirkt“* (BGE 2020a, S. 128).

Der Ansatz der BGE, für das wasserlösliche Steinsalz besondere Bewertungsmaßstäbe anzusetzen, ist nachvollziehbar.

Das StandAG formuliert in Anlage 11 zu den ersten beiden Indikatoren als Definition für die Bewertungsgruppe *„bedingt günstig“*: *„flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Überdeckung, flächenhafte aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Verbreitung grundwasserhemmender [bzw. erosionshemmender] Gesteine im Deckgebirge“*. Im Zwischenbericht Teilgebiete ist u. E. nicht ausreichend nachvollziehbar dargelegt, warum dieser Grundsatz, insbesondere auch in einer möglichen Kopplung mit der Bewertung weiterer Abwägungskriterien und ihrer Indikatoren (z.B. aus Anlage 2), bei der Bewertung der steilen Salzstrukturen wenig oder keine Berücksichtigung findet.

Ob und inwieweit der Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Subrosionsprozesse beeinträchtigt wird, hängt u.a. von der Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der

Mächtigkeit der Steinsalzscheibe oberhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ab, sowie von den hydraulischen Gradienten im Deckgebirge als Voraussetzung für eine Grundwasserbewegung. Eine abschließende Bewertung der Subrosionsprozesse ist im Einzelfall nur anhand von standortspezifischen Detailinformationen möglich und sollte im weiteren Verfahrensschritt betrachtet werden.

Dies gilt auch für die Auswirkungen der Eiszeiten (Bildung glazialer Rinnensysteme, Abtragung des Deckgebirges, Veränderung der hydrogeologischen Verhältnisse) für den Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahren in den Regionen, in denen sie zu erwarten sind und die bei der Bewertung dieses Kriteriums mit zu berücksichtigen sind.

7.6 Bewertung der quartären Überdeckung

Das Quartär wird von der BGE im derzeitigen Verfahrensschritt *„grundsätzlich als weder grundwasser- noch erosionshemmend angesehen“* (BGE 2020x, S. 8). Als Konsequenz daraus werden alle identifizierten Gebiete deren Wirtsgesteinsoberfläche das Quartär schneiden, mit *„ungünstig“* bewertet. Zu der pauschalen Betrachtung des Quartärs führt die BGE aus:

„Die Bewertung der Überdeckung auf Basis der stratigrafischen Horizonte stellt eine vereinfachte Vorgehensweise in diesem Schritt des Verfahrens dar. Aufgrund des geringen Alters und Tiefenlage, fehlender Diagenese sowie der überwiegend sandig und kiesigen Ausprägung eiszeitlicher Sedimente besitzt das Quartär die geringste Schutzwirkung aller im Deckgebirge vorkommenden stratigrafischen Horizonte. Obwohl tonige grundwasserhemmende Lagen in größeren Mächtigkeiten vorkommen können, sind für diese aufgrund der eiszeitlichen Entstehungsweise, mit wechselnden Ablagerungsbedingungen, lokal begrenzte und lückenhafte Ausprägungen zu erwarten. Außerdem kommt es durch die glazial bedingte Erosion tertiärer Sedimente zu einer heterogenen Schichtenabfolge. Das Quartär wird daher als ungünstigste stratigrafische Einheit in Bezug auf grundwasser- und erosionshemmende Gesteine angesehen und eignet sich somit für eine erste vergleichende Einschätzung des Deckgebirges.“ (BGE 2020x, S. 8-9)

Wir können uns der Einschätzung der BGE anschließen, dass für das Quartär grundsätzlich von einer geringeren Schutzfunktion auszugehen ist. Diese Annahme sollte jedoch gebietsspezifisch nach der vorliegenden Lithologie überprüft werden, eine als *„vereinfacht“* und *„für eine erste vergleichende Einschätzung [geeignet]“* beschriebene Vorgehensweise wird dem u. E. nicht gerecht. Im niedersächsischen Quartär stehen Schichten an, die als grundwassergeringleitend zu bezeichnen sind. Hierzu zählen u.a. die verbreiteten und oftmals stark tonigen Grundmoränen, sowie Beckentone wie die Lauenburger Tone, die lokale Grundwassergingleiter darstellen können. Während die Mächtigkeiten der Grundmoränen im Meterbereich liegen, liegen die der Lauenburger Tone im Zehnermeterbereich. Die flächenhafte Verbreitung liegt i.d.R. in Größenordnungen von Quadratkilometern.

7.7 Bewertung von Tongesteins-Gebieten mit fehlender bzw. geringer Überdeckung

Im „Zwischenbericht Teilgebiete“ (BGE 2020, S. 126) schreibt die BGE: *„Die ersten 100 m des Deckgebirges werden vom Gesetzgeber als nicht schützenswert angesehen (§ 21 Abs. 2 StandAG). Daher wurden identifizierte Gebiete mit einer minimalen Teufe der Wirtsgesteinsoberfläche kleiner als 100 m als unterhalb der Geländeoberkante „ungünstig“ bewertet.“*

Der hier gezogene Zusammenhang zu den Sicherheitsvorschriften nach §21 StandAG ist nicht nachvollziehbar, da diese einem anderen Zweck unterliegen.

Die pauschal „*ungünstige*“ Bewertung von identifizierten Tongesteins-Gebieten mit einer minimalen Teufe der Wirtsgesteinsoberfläche kleiner als 100 m ist zudem aus geowissenschaftlicher Sicht nicht sinnvoll: In identifizierten Gebieten mit dem Wirtsgestein Tongestein reichen die Tongesteine oftmals bis an, bzw. bis nahe an die Erdoberfläche heran (z.B. die Unterkreide-Tongesteine in einigen Regionen Niedersachsens). Diese Tongesteinsformationen können mehrere Hundert bis über 1.000 m mächtig sein und bieten aufgrund ihrer geringen hydraulischen Durchlässigkeit ggfs. einen wirksamen Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als grundwasserhemmende Gesteine. Bei der Bewertung potenzieller Erosionsprozesse sind neben den Gesteinseigenschaften zusätzlich die zu erwartenden Erosionskräfte zu berücksichtigen. Diese Kräfte sind am stärksten in Hebungsgebieten und in Gebieten, in denen mit glazialen Rinnen gerechnet werden muss. In Gebieten mit geringen Erosionskräften können Tongesteine geologisch lange Zeiträume überdauern. Aus diesen Gründen sollten identifizierte Tongesteins-Gebiete mit fehlender bzw. geringer Überdeckung nicht per se als „*ungünstig*“ bewertet werden, da sie eine wirksame Schutzfunktion für einen ewG bieten können.

7.8 Bewertung struktureller Komplikationen

Die im 3. Indikator zu betrachtenden strukturellen Komplikationen, die sich möglicherweise in wirtsgesteinsüberlagernden Gesteinseinheiten befinden und aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben können, sollten wirtsgesteinsspezifisch stärker differenziert werden. So müssen beispielsweise Tongesteine und Kristallingesteine im Gegensatz zu Salzgesteinen nicht vor subrosiven Beeinträchtigungen geschützt werden. Hydraulische und mechanische Beeinträchtigungen, die durch strukturelle Komplikationen hervorgerufen werden, sind zwar auch in Tongesteinen und Kristallingesteinen vorhanden, jedoch würden diese Beeinträchtigungen im Deckgebirge an z.B. Karststrukturen und Störungen vermutlich auf punkt- oder linienförmige Bereiche beschränkt bleiben und sich von dort nicht wesentlich vergrößern, da große Hohlraumbildungen in Ton- und Kristallingesteinen nicht stattfinden.

8 Verwendete Unterlagen

Alfarra, A. et al. (2020): Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation größerer Mächtigkeit (T1), Ergebnisse aus dem Vorhaben RESUS. - Peine, 03.04.2020.

Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-deutschland und dem deutschen Nordseesektor: Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie.- Geol. Jb., A153: 88 S.; Stuttgart (Schweizerbart).

Bear, J. (1972), Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier Publishing Company, New York, 764 p.

BGE (2020): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Stand 28.09.2020. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE).

BGE (2020a): Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von §13 StandAG. Stand: 03.09.2020.

BGE (2020ag): Anlage 1A (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG). Ergebnisse der Bewertung: Teil A (Teilgebiete). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.

BGE (2020ah): Anlage 1B (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG). Ergebnisse der Bewertung: Teil B (Keine Teilgebiete). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.

BGE (2020b): Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG, Stand 01.09.2020.

BGE (2020j): Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.

BGE (2020k): Teilgebiete und Anwendung – Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß §24 StandAG (Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete). Stand: 28.09.2020.

BGE (2020l): Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.

BGE (2020x): Vorgehensweise bei der Bewertung der Indikatoren „Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge“ und „Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ des Kriteriums zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge (Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG) im Rahmen von § 13 StandAG. Ergänzende Erläuterungen zur untersetzenden Unterlage „Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ Stand 11.12.2020.

BGR et al. (2020): Informationssystem Salz: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) – Doppelsalinare und flach lagernde Salzsichten (InSpEE-DS), Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie.

Blum, P., Mackay, R., Riley, M.S., and Knight, J.L. (2005): Performance assessment of a nuclear waste repository: Upscaling coupled hydro-mechanical properties for far-field transport analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42: 781-792.

Bombien, H., Hoffers, B., Breukmann, S., Helms, M., Lademann, K., Lange, M., Oelrich, A., Reimann, R., Rienäcker, J., Schmidt, C., Slaby, M.F., Ziesch, J. (2012): der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordseesektor als geologisches 3D-Modell. GMIT Nr. 48, Juni 2012.

Bucher, K. and I. Stober (2010): Fluids in the upper continental crust. *Geofluids* (2010) 10, 241–253.

Busch, K-F., Luckner, L. und K. Tiemer (1993): Geohydraulik. Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 3, 3. neu bearbeitete Auflage, 238 Abb., 50 Tabellen, Gebrüder Borntraeger Berlin Stuttgart, ISBN 3-443-01004-0.

Engelhardt und Tunn (1954): Über das Strömen von Flüssigkeiten durch Sandsteine*. *Heidelberger Beiträge zur Mineralogie und Petrographie*, Bd. 4, S. 12-25.

GRS (2012): FEP-Katalog für die VSG (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben). GRS-Bericht zum Arbeitspaket 7, Dokumentation. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH.

Jasmund, K. und G. Lagaly (1993): Tonminerale und Tone. Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt – Darmstadt: Steinkopff, ISBN 3-7983-0923-9.

Louis, C (1967): A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses. Accepted Thesis for the acquisition of the Academic Degree of "Doktor-Ingenieur" of the Faculty of Civil Engineering and Surveying of the Universität (TH) Karlsruhe.

Lux, K.-H. und Eberth, S. (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten“. Clausthal-Zellerfeld.

Neuman, S.P. (1994): Generalized scaling of permeabilities: validation and effect of support scale.- *Geo-phys. Res. Lett.* 21(5): 349-352.

OECD (2010): NEA No.6184. Self-sealing of Fractures in Argillaceous Formations in the Context of Geological Disposal of Radioactive Waste Review and Synthesis ISBN: 978-92-64-99095-1.

Ranjram, M., Gleeson, T. and E. Luijendik (2015): Is the permeability of crystalline rock in the shallow crust related to depth, lithology or tectonic setting?. *Geofluids* (15), S. 106 – 119.

Song, J. (2016): Gekoppelte numerische Modellierungen von Strömungs- und Deformationsprozessen im Kluftgestein als Planungstool am Beispiel Pumpspeicherkraftwerk in Blautal. Dissertation – Rheinisch-Westfälischen TH Aachen, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik, S. 163, Abb. 270, Tab. 16, <http://publications.rwth-aachen.de/record/660195/files/660195.pdf>.

StandAG (2017): Gesetz zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze. – *Bundesanzeiger Nr. 26 vom 15.05.2017, 05.05.2017.*

Stober, I. (1989): Die Anwendbarkeit des DARCY-Gesetzes in der Hydrogeologie - alternative Fließgesetze. *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg*, Band 31, S. 215-231, 5 Abb, 1 Tabelle.